

超伝導 FFAG マグネット

宮原信幸、三須敏幸、岩田佳之、北條悟、杉浦章則、金沢光隆、村上健、山田聰
放射線医学総合研究所 先進小型加速器事業推進室
〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

概要

現在放医研において検討されている医療用炭素ビーム加速用 FFAG のマグネットを超伝導とする上で必要な技術的な問題点について検討を加える。

超伝導マグネットではクエンチに対して安定なマグネットとするために超伝導線材の機械的安定性⁽¹⁾が求められるので、超伝導線材をコイルに整形した後に銅のブロックに埋め込む形式を提案した。冷却のために大型の冷凍機を併設する形式では法規ならびにランニングコストの面からも病院併設施設としては考えにくい。大型冷凍機直接冷却⁽²⁾ならびに液体He浸漬+冷凍機直接冷却の冷却方式を検討する。

次にKEKで検討されている150 MeV-FFAG陽子シンクロトロン⁽³⁾とは異なるダブレット構造(Focusing section: F極, Defocusing section: D極)を採用しこのマグネットモデルに対して三次元磁場計算を行ない所期の $K=1$ の磁場分布が得られるか検討を加えた。また、動径方向(θ 方向)への磁場分布が入射・出射軌道、チューンの変動さらにRF加速空洞に影響を与えることが考えられるので検討を加える。

1 はじめに

粒子線がん治療臨床試験は順調に行われており、地方自治体での粒子線治療も行われるようになった。

粒子線がん治療、特に炭素線治療装置においては陽子線の場合に比較して装置が大型であることもさることながら、建設コストが高いことが常に問題視⁽⁴⁾されている。FFAGはKEKの森ら⁽³⁾により実証器が製作されており、陽子線治療等を目的とする150 MeV陽子線FFAGの建設⁽³⁾も行われている。このFFAGは半径方向に傾きを持った固定磁場により加速粒子の軌道半径を保持しつつRFによる加速を行うものであり、セクターサイクロトロンのように所期の磁場を作り出すことができれば入射-RF-取り出しの制御を行うのみで運転が可能であり、制御の簡便化、加速器そのものの部品点数低減によるコストダウンが可能⁽³⁾と考えられている。

本研究では炭素線治療用FFAG加速器の電磁石を超伝導とすることにより更なる小型化が可能であるか、超伝導マグネットのモデルを設定し所期の磁場を形成できるか、クライオならびに超伝導コイルの保持が可能であるか等を検討しているのでその一部を報告する。

2 FFAG超伝導磁石の構成

2.1 医療用超伝導FFAG加速器のラティス

医療用超伝導FFAG加速器として想定しているラティスの概略図を図1に示す。12セル構成で入射半径は3.84mで取り出し半径は4.61mで最大磁場は6 T、 K 値は1.1である。

この K は B_0 を入射半径での磁場、 r_0 を入射半径とすると

$$B = B_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^K$$

で表される磁場勾配のインデックスである。

このような磁場勾配を単純なレーストラックコイルで実現することは難しいため図2に示す磁石断面のようなコイル配置とした。想定する線材はNbTi銅比2でSCC用に設計された超伝導線材とする。各コイルモジュールは9のコイルにより構成されそれぞれの電流密度を調整するとともにその位置により磁場勾配を形成する。

図2に示すようなコイルでは線材の長直線部が多く機械的に線材を保持することが難しく線材の動きによるクエンチを惹起しやすい⁽¹⁾ので、機械的に安定させるためと組み立て精度、工法の簡便さ、低温に達した際のプレストレス保持が容易であることから銅のブロックの中に成型後のコイルを埋め込む形式としている。

このブロックを磁石ギャップの両端のカラムにより電磁力を担保することとしている。クライオからのコイルブロックの保持は大きな熱浸入の原因となるので、ここではFRPのブロックをクライオとコイルブロックの間にはさみこむことにより断熱を保ちつつ電磁力を保持することとしている。

室温から4Kの温度勾配を持つ構造とすると熱浸入が激しいため液体窒素のサーマルアンカーを取った上で上述のクライオを冷却する構造とする。熱浸入を可能な限り低減しつつコンパクトな構造となるよう最適化を行っている。現状では冷凍機直接冷却ならびに液体He浸漬+液体Heの蒸発を低減するための冷凍機を組み合わせる方法で検討を進めている。

超伝導では永久電流モードでの運転も大きな利点となりうるので、熱負荷のできるだけ少ない永久電流スイッチの設計を試みる予定である。

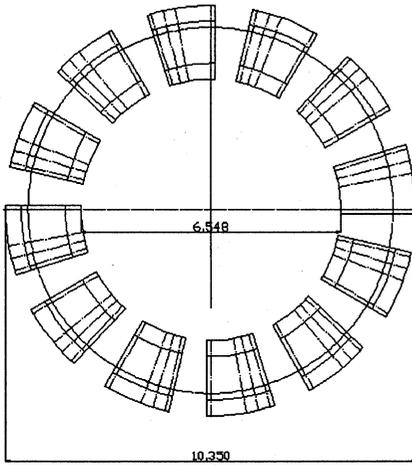
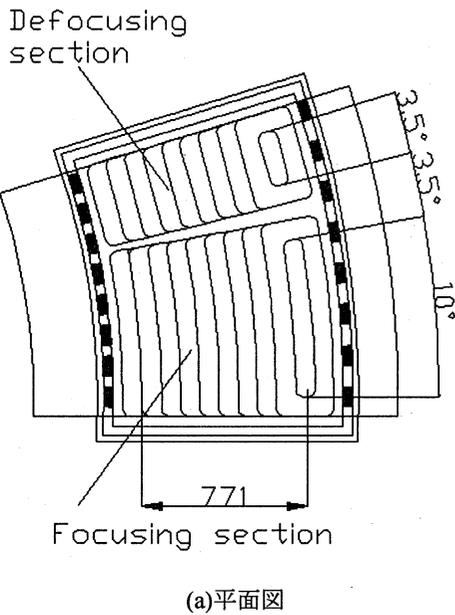


図1：医療用超伝導FFAGのラティス

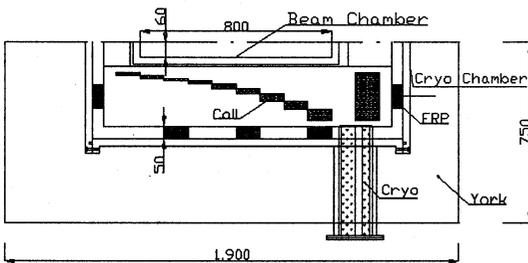
2.2 三次元磁場計算のためのモデル

3次元磁場計算ソフトウェアTOSCAを用いて磁場計算を行うためのモデルを図3に示す。コイルは銅ブロックに埋め込まれているためこの計算モデルでは空芯コイルとして扱う。

F/D極のr方向の計算結果とK=11で計算した磁場との比較を図4ならびに図5に示す。この図よりわかるように3次元磁場計算の値とK=11の磁場とはおおよそ一致を示すが依然若干の調整が必要である。現在トラックに利用できるよう磁場調整を行っている。



(a) 平面図



(b) 断面図

図2：超伝導FFAG電磁石の概略

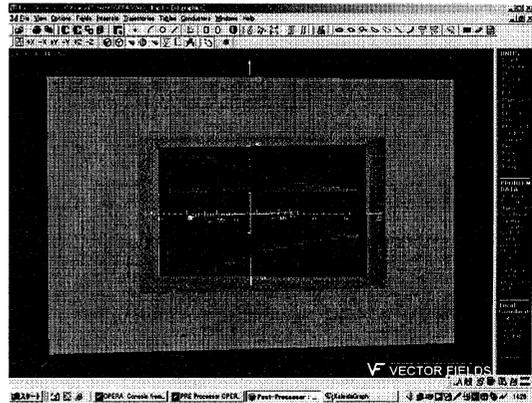


図3：3次元磁場計算モデル

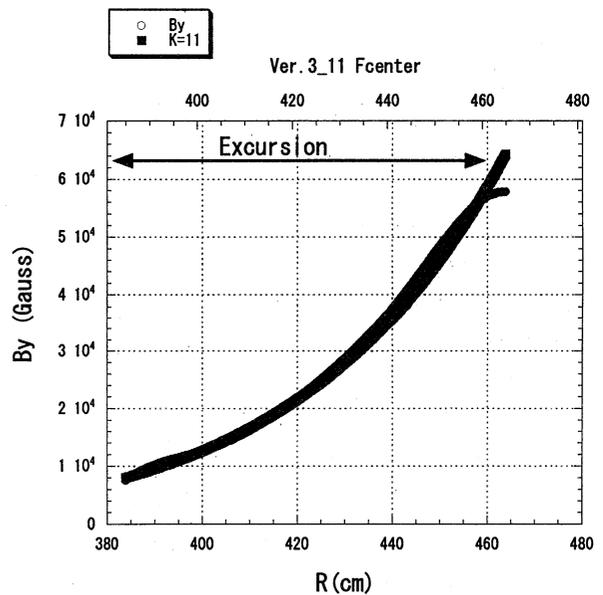


図4：F極r方向磁場分布

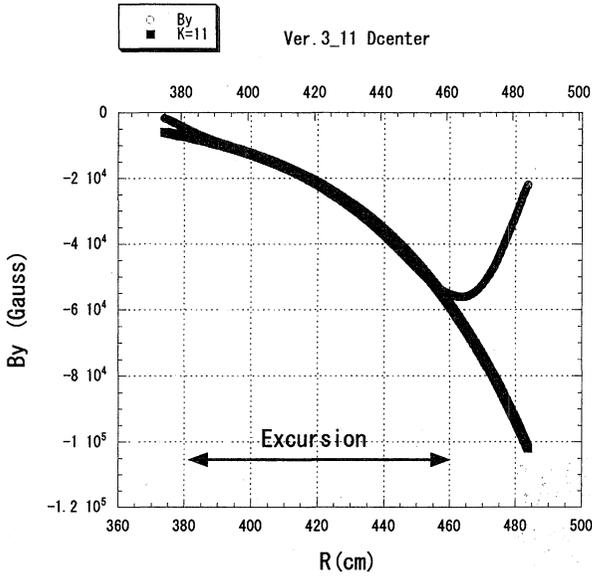


図5 : D極 r 方向磁場分布

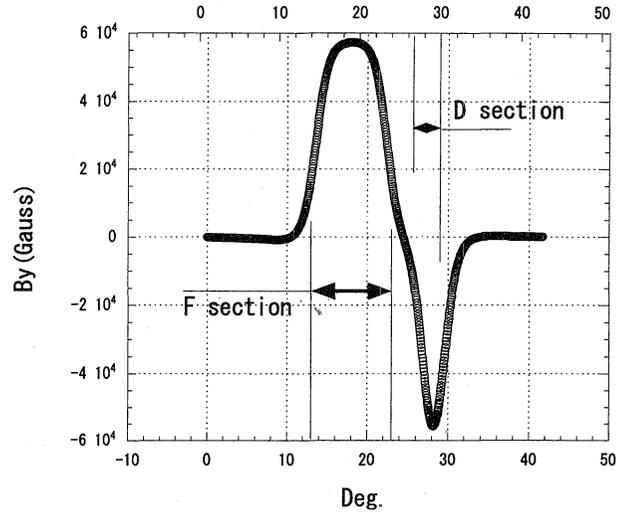


図6 : 取り出し部 θ 方向方向磁場分布

θ 方向の磁場分布は (図6) F 極では比較的平坦な磁場分布が得られる領域があるが D 極では平坦な磁場が得られる領域がほとんどない。今後トラッキング等の解析を加えることにより FFAG 加速器としてビームを回すことができるかを検討する予定である。

θ 方向の磁場分布はチューンや入・出射の軌道に影響を与えるのみでなくドリフトスペース中の機器特に RF 空洞に影響を与えるのでその漏洩磁場レベルを図7に示す。D 極での最大漏洩磁場は磁気シールド等により RF 空洞等が漏洩磁場の影響を受けない対策をとることは可能であると考えられる。一方 F 極側の漏洩磁場はかなり高いレベルであるので磁気シールド程度では漏洩磁場の影響を避けることは難しいと考えられる。最大磁場が 6T ときわめて高い磁場であるので端板等の簡単な処置で漏洩磁場の影響を小さくすることは困難である。トラッキングの結果を考慮しつつコイルの配置を再考する、あるいは鉄ヨークを積極的に利用して漏洩磁場レベルを低減する等の工夫が必要である。

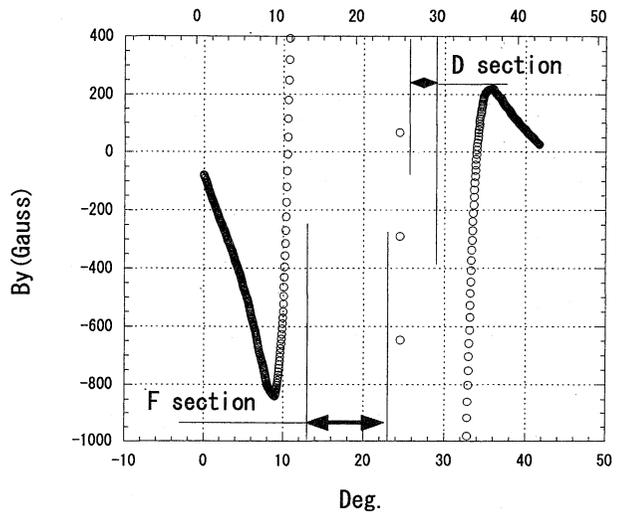


図7 : 漏洩磁場分布

参考文献

- [1] K.H. Mess, *et al.*, Superconducting Accelerator Magnets. World scientific, March. 1996.
- [2] J. Sakuraba, *et al.*, Supercond. Sci. Technol., 13. 12-17, 2000.
- [3] 森ら, 原子核研究, “汎用 150MeVFFAG シンクロトロン の開発検討会, Vol.46 No.6 March.. 2002.
- [4] 大川ら, “癌・放射線治療 2002”, 篠原出版, March.2002.